

γ -聚谷氨酸对全麦冷冻面团烘焙特性的影响

Effects of γ -polyglutamic acid on baking properties of whole wheat frozen dough

王家宝 何 松 苏子良 黄美凤

WANG Jia-bao HE Song SU Zi-liang HUANG Mei-feng

杨 笛 余 寒 黄富强 何虹燕

YANG Di YU Han HUANG Fu-qiang HE Hong-yan

(广东广益科技实业有限公司, 广东 东莞 523075)

(Guangdong Guangyi Science & Technology Industry Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523075, China)

摘要:将 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)添加至全麦冷冻面团中,通过全麦粉持水率、酵母存活率研究 γ -PGA 的保水性和抗冻活性;以面包比容和质构等作为评价指标,研究 γ -PGA 对冷冻面团制作的全麦面包烘焙品质的影响。结果表明,添加 γ -PGA 可提高冷冻全麦面团的酵母存活率和发酵高度,增大全麦面包比容,减小面包硬度,促进面包芯中形成大气孔;贮藏 3 d 后,添加 γ -PGA 的全麦面包硬度和老化率显著降低($P < 0.05$),且 γ -PGA 的最佳添加量为 1%。

关键词:冷冻面团; γ -聚谷氨酸;全麦面包;烘焙特性

Abstract: The water holding capacity and anti-freezing activity of whole wheat frozen dough with the addition of γ -polyglutamic acid (γ -PGA) were studied by the water holding capacity of whole wheat flour and the survival ratio of yeast. The effect of γ -PGA on the baking quality of whole wheat frozen dough was studied by specific volume and texture of bread. The results showed that the addition of γ -PGA could improve the yeast survival ratio and fermentation height of whole wheat frozen dough, increase the specific volume and reduce the hardness of whole wheat bread. In addition, γ -PGA promoted the formation of large pores in bread crumb. The hardness and staling rate of whole wheat bread with 1% γ -PGA decreased significantly after 3 days of storage ($P < 0.05$). The best addition group of γ -PGA in this experiment was 1%.

Keywords: frozen dough; γ -polyglutamic acid; whole wheat bread; baking properties

全麦面包是全球众多国家和地区的传统烘焙食品,因含有小麦麸皮、胚芽,其营养和健康益处特点更加突出^[1]。研究^[2]指出,全麦粉可降低心血管病等疾病风险,被认为是营养健康食品。冷冻面团技术是采用冻藏原理保藏面团从而简化门店制作面包工序的现代烘焙加工技术,运用冷冻面团技术生产全麦面包可提高生产效率。但是面团在冷冻过程中,游离水的结晶会破坏面筋结构^[3],面筋蛋白被冰晶破坏后导致保留气体能力差,造成面包比容减小^[4]。

γ -聚谷氨酸(γ -PGA)是日本发酵食品纳豆的主要成分之一,是通过枯草芽孢杆菌产生的谷氨酸分子聚合物,在日本、韩国可作为天然的食品添加剂使用,是一种天然的生物抗冻剂^[5]。此外, γ -PGA 具有高吸水保湿性和生物可降解性^[6]。时晓剑等^[7]发现 γ -PGA 可以提高酵母的抗冷冻性,谢新华等^[8]研究发现 γ -PGA 可减弱冻藏对面筋网络的破坏,抑制蛋白二级结构向不稳定状态的变化,改善面筋蛋白的冻藏稳定性。冷冻全麦面团受到冷冻冰晶刺穿面筋蛋白和麸皮稀释面筋蛋白的双重破坏,面团若想保持良好的抗冻、发酵和入炉膨胀性能就需要添加抗冻剂。而工业化生产重视面粉持水率,因为面粉持水率的提高有助于增大面团得率、节约成本,高保湿性添加剂可改良面粉持水、面团品质特性。曾有学者针对添加 γ -PGA 的面筋蛋白^[9]和淀粉糊化^[10]的变化进行了探究,但是关于 γ -PGA 对模拟工业化生产工艺的冷冻全麦面团和全麦面包烘焙特性的影响尚未见报道。试验拟探索 γ -PGA 作为改良剂添加至冷冻全麦面团中,并分析 γ -PGA 对冷冻全麦面团面包烘焙品质的影响,探究其在冷冻面团应用的工业潜力,为烘焙工业开发天然的食品添加剂提供新思路。

作者简介:王家宝,男,广东广益科技实业有限公司工程师,硕士。

通信作者:何松(1978—),男,广东广益科技实业有限公司高级工程师,硕士。E-mail: hesong@guangyi.net

收稿日期:2020-09-22

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

金焙全麦粉:厦门海嘉面粉有限公司;

白砂糖、食盐:市售;

即发干酵母:乐斯福管理(上海)有限公司;

金味奶酥油:益海嘉里粮油公司;

复配防腐剂、食品用脱氧剂(30 型):广益科技实业有限公司;

γ -聚谷氨酸(γ -PGA):普瑞斯生物有限公司;

抗坏血酸:东北制药集团股份有限公司;

双乙酰酒石酸单双甘油酯:巴斯夫(中国)有限公司;

YPD 琼脂:上海瑞楚生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

搅拌机:HSE-15 型,恒威建亿贸易有限公司;

压面机:HS2252 型,广州浩胜食品机械设备有限公司;

醒发箱:SPC-40FP 型,新麦机械(无锡)有限公司;

烤炉:SM2-523 型,新麦机械(无锡)有限公司;

扫描仪:MX-M350U 型,夏普商贸(中国)有限公司;

质构仪:EZ-SX100N 型,日本岛津公司;

水分测定仪:XY-100MW-A 型,常州幸运电子设备有限公司;

正方体吐司模具:SN2180 型,三能食品器具股份有限公司;

恒温培养箱:LRH-250-HS 型,韶关泰宏医疗器械有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 全麦粉持水率测定 按不同添加量(0.0%,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%)将 γ -PGA 添加到 3.0 g 全麦粉中并混匀,然后加入到 30 mL 去离子水中,漩涡震荡使其混匀,静置 2 h。4 000 r/min 离心 30 min,去上清液后称重。按式(1)计算全麦粉的持水率。

$$C_{WH} = \frac{M-m}{m} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C_{WH} ——全麦粉的持水率,%;

M ——去上清液后湿面粉质量,g;

m ——全麦粉质量,g。

1.2.2 面团制作配方 全麦粉 1 000 g,水 650 g,干酵母 20 g,白砂糖 60 g,盐 15 g,起酥油 30 g,抗坏血酸 50 mg,双乙酰酒石酸单双甘油酯 5 g,并分别按全麦粉质量的 0.0%,0.5%,1.0% 和 2.0% 添加 γ -PGA。

1.2.3 制作工艺 将原料(除黄油和盐)放入搅拌机,慢速混合 5 min,快速 2 min,形成少量面筋。抹上黄油和

盐,慢速混合 3 min,快速搅拌 1 min 至面筋扩展。使用压面整形机进行压面(5 个来回),压成 8 mm 的厚度。将面团分割成 150 g/个,揉圆并排气成型。覆盖保鲜膜后于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下速冻 30 min。分别进行恒温冻藏和反复冻融,恒温冻藏温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$;反复冻融为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏 24 h, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下解冻 60 min,循环 5 次。将每个面团放入内径为 75 mm $\times$ 75 mm $\times$ 75 mm 的立方体吐司模具中, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏解冻 12 h,于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 75% 的醒发箱发酵 1.5 h,盖上吐司盖并放入烤炉(上火、下火温度均为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$)烘焙 25 min。冷却后的面包与脱氧剂一同放入聚偏二氯乙烯涂布聚丙烯(KOP)复合膜包装袋中进行封口包装。

1.2.4 冷冻面团酵母存活率测定 根据文献[11]修改如下:将新鲜和冻藏的冷冻面团从中心剪下 1 g 置于 9 mL 0.85% 的无菌生理盐水中,漩涡震荡使其混匀。吸取 1 mL 上清液进行系列梯度稀释,分别吸取 100 μL 稀释液涂布于 YPD 平板中, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h。

1.2.5 面团发酵高度测定 将 150 g 冷冻面团放置于直径为 90 mm 的圆底烧杯中,将面团压平覆盖烧杯底部,于 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 75% 的醒发箱中发酵 60 min 后测量面团高度。

1.2.6 面团水分含量测定 冻藏面团于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解冻 12 h,从面团中心称取 2~3 g,采用水分测定仪进行测定。

1.2.7 全麦面包烧减率测定 根据文献[12]的方法。

1.2.8 全麦面包比容测定 根据文献[13]的方法。

1.2.9 质构分析 根据文献[14]修改如下:将面包切成厚度为 12 mm 薄片,使用 P/36 探头对中心的两片面包进行连续 2 次压缩测试。测前速度 1.0 mm/s,测试速度 3.0 mm/s,测后速度 1.0 mm/s,压缩程度 40%,测定面包硬度和回复性。

1.2.10 老化率分析 根据文献[15]的方法。

1.2.11 面包截面结构分析 面包切片后,以每英寸 600 个点扫描面包的横截面图像,采用 Image J 软件选取面包扫描图片中心 40 mm $\times$ 40 mm 区域。通过阈值转化法将灰度图处理为二值图。软件可分辨的气孔面积为 0.01~100.00 mm²,分析气孔面积分率和分形维数^[16]。并定义气孔面积 1~100 mm² 的为大型气孔,大型气孔分率为图像中的大型气孔数与总气孔数之比值。

1.2.12 数据统计分析 采用 SPSS 16.0 软件对数据进行显著性分析和相关性分析,显著差异水平取 $P<0.05$;采用 OriginPro 8.5 软件对数据进行分析绘制;采用 Image J 软件对图像进行处理。

2 结果与分析

2.1 γ -聚谷氨酸对全麦粉持水率的影响

由图 1 可知,全麦粉持水率随 γ -PGA 添加量的增大

而显著增大,当 γ -PGA 添加量为 1.0%,1.5% 时,全麦粉持水率由对照组的 107% 分别升高至 117%,124%;当 γ -PGA 添加量为 1.5%,2.0% 时,二者的全麦粉持水率无显著性差异,说明过高浓度的 γ -PGA 并不会继续提高全麦粉持水率。有文献^[17]报道 γ -PGA 水凝胶的多袋状结构能吸收大于自身重量的水分,因此 γ -PGA 具有优良的吸水性和保水性。谢新华等^[9]向面筋蛋白中添加 1.0% 的 γ -PGA,持水率比对照组提高了 29%。

2.2 γ -聚谷氨酸对酵母存活率和面团发酵高度的影响

2.2.1 酵母存活率 由图 2 可知,酵母菌存活率随 γ -PGA 添加量的增大而提高,当 γ -PGA 添加量为 1.0%,2.0% 时,二者的酵母存活率无显著差异,均高达 75% 以上,而未添加 γ -PGA 的存活率仅为 54%,说明 γ -PGA 可显著提高酵母在全麦面团冻藏过程的存活率,提高酵母抗冻能力。Lu 等^[18]研究发现同为聚氨基酸的 ϵ -聚-L-赖氨酸可通过静电相互作用与酵母细胞膜的阴离子成分结合,从而对酵母产生冷冻保护作用。丁珊珊等^[19]也发现 γ -PGA 具有较强的抗冻活性。Kumio 等^[6]研究表明加入 γ -PGA 后,酵母存活率显著增加,但添加量超过 1.0% 后

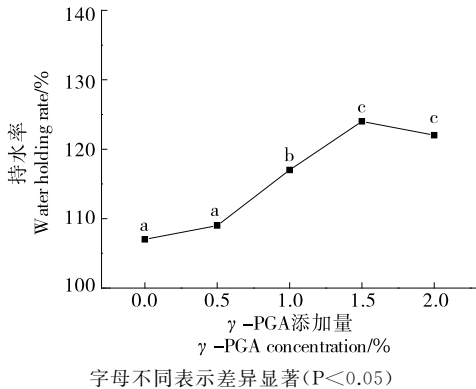


图 1 γ -聚谷氨酸对全麦粉持水率的影响

Figure 1 Effects of γ -PGA on the water holding rate of whole wheat flour

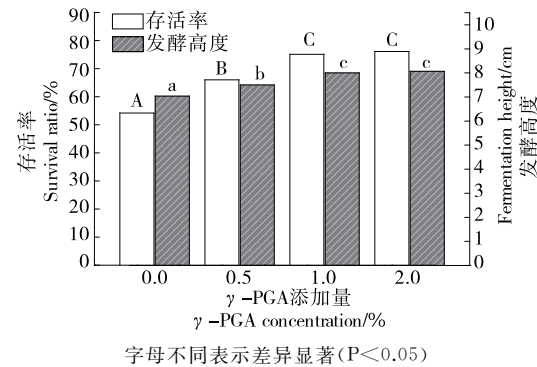


图 2 γ -聚谷氨酸对酵母存活率和面团发酵高度的影响
Figure 2 Effects of γ -PGA on the survival ratio of yeast and fermentation height of dough

酵母存活率不再提高。

2.2.2 面团发酵高度 由图 2 可知,不同 γ -PGA 添加量的全麦面团的醒发发酵高度具有显著差异,而发酵高度综合反映了酵母发酵过程的产气特性和面筋持气稳定性^[20]。与未添加 γ -PGA 组相比,当 γ -PGA 添加量为 1.0% 时,其发酵高度增加了 13.8%,说明 γ -PGA 可有效提高冷冻全麦面团的发酵高度。Jia 等^[21]认为这与酵母的死亡率有关,酵母死亡率越低,酵母活性越大,醒发能力越强。相关性分析发现,试验的面团醒发高度与酵母存活率呈正相关,其线性相关系数 $R^2 = 0.992$,说明全麦冷冻面团中的酵母存活率越高,越有助于面团发酵。这可能是因为 γ -PGA 通过对酵母的抗冻保护提高存活率从而改善冷冻面团的发酵性能。

2.3 γ -聚谷氨酸对面团含水量和烧减率的影响

2.3.1 面团含水量 由表 1 可知,冻融循环的全麦面团水分含量基本上比恒温冻藏的有所下降。Xu 等^[22]发现面团经冻融循环后,持水能力显著降低($P < 0.05$)。冻融循环中,冰晶生长和再结晶可能会引起面筋网络变弱,水分分布发生变化,水分迁移并流失。含有 γ -PGA 的冷冻全麦面团比对照组具有更高的水分含量,可能与 γ -PGA 提高全麦粉持水量有关。此外, γ -PGA 的亲水基团与水分子形成氢键从而抑制冰晶形成,具有良好的抗冻活性^[23],从而保护面团网络结构和持水能力。

2.3.2 烧减率 烧减率是表示烘焙食品在加热情况下的水分损失百分比,水分损失的程度是评价烘焙工艺和产品品质的重要指标之一。由表 1 可知,添加 γ -PGA 有助于减小烧减率,有助于保持烘焙后的面包湿润程度;恒温冻藏组,添加 2.0% γ -PGA 可使烧减率从对照组的 10.9% 下降至 9.6%。结合面团含水量和烧减率,冻藏过程持水性的改善说明面团面筋结构保持得好,从而表现在烘焙过程中烧减率下降。冻融循环组的全麦面团烧减率明显高于恒温冻藏组,这与冻融循环使得面筋网络被冰晶破坏造成烘焙过程中面团持水能力下降有关,进而在烘焙过程中更易损失水分。

表 1 γ -聚谷氨酸对面团含水量和烧减率的影响 [†]				
Table 1 Effects of γ -PGA on water content and baking loss rate of dough				
loss rate of dough				
%				
γ -PGA	冻融循环		恒温冻藏	
添加量	含水量	烧减率	含水量	烧减率
0.0	44.63 $\pm$ 0.28 ^{ab}	14.2 $\pm$ 0.8 ^d	44.13 $\pm$ 1.40 ^a	10.9 $\pm$ 0.8 ^b
0.5	43.87 $\pm$ 0.19 ^a	13.9 $\pm$ 0.8 ^{cd}	45.65 $\pm$ 0.22 ^{bc}	10.2 $\pm$ 0.9 ^{ab}
1.0	44.21 $\pm$ 0.28 ^a	13.5 $\pm$ 0.2 ^{cd}	46.13 $\pm$ 0.64 ^c	10.8 $\pm$ 0.6 ^{ab}
2.0	44.69 $\pm$ 0.08 ^{ab}	12.7 $\pm$ 0.4 ^c	46.37 $\pm$ 0.20 ^c	9.6 $\pm$ 0.6 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.4 γ -聚谷氨酸对全麦面包烘焙特性的影响

2.4.1 比容 由图 3 可知,面团冷冻贮藏造成酵母活力和面筋质量下降,反复冻融循环更是加剧了这些变化,导致面团醒发速度慢、面包比容小。与未添加 γ -PGA 组相比,添加 γ -PGA 后,恒温冻藏组和冻融循环组的比容显著增大,是因为 γ -PGA 提高了酵母存活率,增大了产气量使全麦面团醒发高度上升,比容增大。当 γ -PGA 添加量 $<1.0\%$ 时,全麦面包比容随 γ -PGA 添加量的增大而增大,与 Shyu 等^[24] 的研究结果相似;当 γ -PGA 添加量为 2.0% 时,面包比容呈减小趋势,可能是因为 2.0% 的添加量对全麦面团的黏弹性产生影响,导致面团发黏,反而难以在揉面操作过程中成型,以及黏性过高影响面团在烤炉内受热膨胀。相同 γ -PGA 添加量下,冻融循环组的比容比恒温冻藏组的小,是因为反复冻融过程中冰晶的再生长和重结晶程度更深,造成了面筋蛋白结构发生不可逆的破坏^[25]。

2.4.2 面包芯结构 气孔面积分率(AF)越大,说明体系的持气能力和稳定性越好,添加 γ -PGA 可提高面包的 AF 值。一方面, γ -PGA 可能改善酵母菌的存活率,增加面团产气量;另一方面, γ -PGA 可改善面团的乳化特性^[26],从而提高面团持气量,乳化作用使得面团中的气泡在醒发过程中扩展,最终表现为提高面包的气相面积分率。

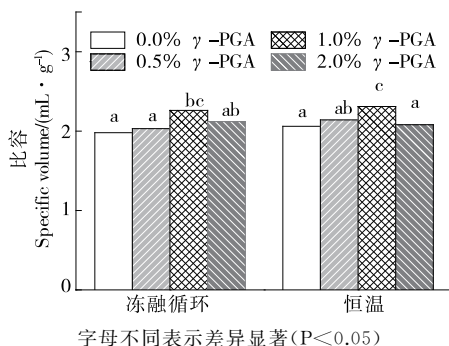
由表 2、图 4 可知,当 γ -PGA 添加量为 1.0% 时,恒温冻藏组面包出现不均匀的气孔和一些大的气孔,大气孔

分率显著提高($P<0.05$);分形维数随 γ -PGA 添加量的增大而增大。图像的分形维数表征图形的复杂性,分形维数越大表示气孔变形程度越大^[27]。添加 γ -PGA 导致形成大气孔分率和分形维数变大的原因可能是由于气泡失稳,气泡歧化是由于较小的气泡收缩或不生长,而较大的气泡生长更快。小气泡的拉普拉斯压力较高,会迁移、聚集成较大气泡^[28]。 γ -PGA 的高黏性虽然有助于保持面团的持气量,但无法阻止气体的迁移,形成的小气泡会发生歧化、聚集成大气泡,因此导致添加较多 γ -PGA 的全麦面包芯存在更多的大气孔。

2.4.3 质构 硬度越低说明面包口感越软。由表 3 可知,添加 1.0% 的 γ -PGA 可显著减小面包硬度。面包的柔软度与比容有关,良好的面团结构和适量的大气泡能增大烘焙后的面包比容,促进更松软的面包结构。回复性与面包品质呈正相关^[29],当 γ -PGA 添加量 $<1.0\%$ 时,全麦面包回复性无显著性差异,但 2.0% 添加量的回复性显著减小,不利于面包贮藏、运输过程中受压力变形的恢复。综上,添加 1.0% 的 γ -聚谷氨酸对全麦面包质构品质具有改善作用。

2.5 γ -聚谷氨酸对面包老化的影响

面包硬度增加的程度是评价老化速度的重要指标^[30]。由表 3 可知,贮藏期间面包芯硬度有着不同程度的增加。贮藏 3 d 后,恒温冻藏组的硬度小于对应的冻融循环组。由于各组全麦面包初始硬度不同,老化率可更客观描述贮藏过程中硬度的变化速度。贮藏 3 d 后,当 γ -PGA 添加量为 0.0% 时,冻融循环组和恒温冻藏组的全



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 3 γ -聚谷氨酸对面包比容的影响

Figure 3 Effects of γ -PGA on the specific volume of bread

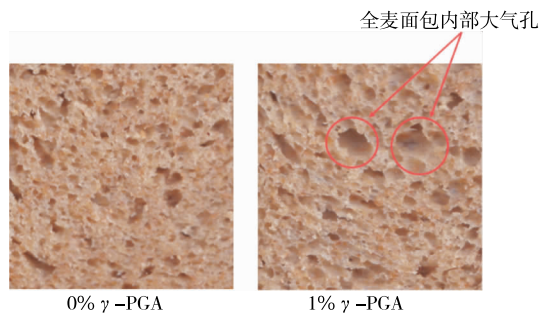


图 4 恒温冻藏面包芯成像解析图

Figure 4 Image analysis of bread crumb structure of constant frozen storage

表 2 γ -聚谷氨酸对面包芯结构的影响[†]

Table 2 Effects of γ -PGA on structure of bread crumb

γ -PGA 添加量/%	冻融循环			恒温冻藏		
	气孔面积分率/%	大气孔分率/%	分形维数	气孔面积分率/%	大气孔分率/%	分形维数
0.0	24.3±1.0 ^a	8.3±0.7 ^a	1.678±0.017 ^{ab}	23.5±1.9 ^a	9.9±1.6 ^{abc}	1.673±0.017 ^a
0.5	23.4±0.6 ^a	9.0±0.8 ^{ab}	1.684±0.006 ^{ab}	25.0±1.1 ^{ab}	8.8±1.1 ^{ab}	1.692±0.009 ^{ab}
1.0	30.5±0.9 ^c	10.7±0.6 ^{cd}	1.710±0.016 ^{bc}	29.9±1.8 ^c	11.2±1.4 ^d	1.733±0.035 ^c
2.0	27.2±1.6 ^b	10.8±0.6 ^{cd}	1.707±0.008 ^{abc}	30.6±1.4 ^c	10.4±0.5 ^{bc}	1.733±0.011 ^c

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 γ -聚谷氨酸对面包质构和老化率的影响[†]
Table 3 Effects of γ -PGA on texture of and staling rate bread

γ -PGA 添加量/ %	冻融循环				恒温冻藏			
	0 d 硬度/N	0 d 回复性	3 d 硬度/N	老化率/(N · d ⁻¹)	0 d 硬度/N	0 d 回复性	3 d 硬度/N	老化率/(N · d ⁻¹)
0.0	11.79±0.01 ^c	0.436±0.016 ^b	21.88±0.48 ^d	3.36±0.16 ^d	11.86±0.18 ^{cd}	0.431±0.011 ^b	19.87±0.04 ^c	2.67±0.04 ^c
0.5	14.32±0.79 ^e	0.430±0.033 ^b	19.86±0.76 ^c	1.85±0.01 ^b	12.77±0.04 ^d	0.438±0.001 ^b	16.15±0.71 ^b	1.13±0.22 ^a
1.0	7.10±0.01 ^a	0.429±0.016 ^b	11.18±0.87 ^a	1.36±0.29 ^a	6.70±0.41 ^a	0.439±0.013 ^b	10.27±0.87 ^a	1.19±0.16 ^a
2.0	9.31±0.59 ^b	0.379±0.005 ^b	15.44±0.42 ^b	2.04±0.06 ^b	8.62±0.34 ^b	0.376±0.001 ^a	14.82±0.73 ^b	2.07±0.13 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

麦面包老化率分别为 3.36、2.67 N/d, 当 γ -PGA 添加量为 1.0% 时, 冻融循环组和恒温冻藏组的全麦面包老化率显著降低(P<0.05), 分别为 1.36、1.19 N/d, 说明 γ -PGA 具有抗老化效果。这可能是因为 γ -PGA 与淀粉分子形成氢键, 阻碍了淀粉分子内氢键的形成^[31], 减弱了全麦粉淀粉的重结晶, 从而延缓老化。

3 结论

研究表明, 恒温冻藏和反复冻融循环过程中, 添加 γ -聚谷氨酸有助于改善全麦面团的抗冻、发酵流变和全麦面包的烘焙品质、抗老化特性, 且 γ -聚谷氨酸的最优添加量为 1.0%。添加 1.0% 的 γ -聚谷氨酸可使全麦粉持水率由对照组的 107% 升高至 117%, 全麦冷冻面团发酵高度增加了 13.8%, 改善了面团持气稳定性; γ -聚谷氨酸可增大面包比容, 改善面包芯结构, 添加 1% 的 γ -聚谷氨酸可提高面包切面的气孔面积分率和分形维数, 形成较大气孔, 保持全麦面包柔软, 显著降低全麦面包的老化速率。综上, γ -聚谷氨酸作为抗冻保湿改良剂, 可改善全麦冷冻面团质量和全麦面包烘焙特性。试验中添加 γ -聚谷氨酸因增稠作用导致面团发黏, 后续可考虑引入谷朊粉对面团操作性和全麦粉面筋品质进行改善。

致谢: 感谢厦门海嘉面粉有限公司提供金焙全麦粉和交流指导。

参考文献

[1] LAUREN T, SHEN Yan-ting, LI Yong-hui. Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018(81): 10-24.

[2] OKARTER N, LIU Rui-hai. Health benefits of whole grain phytochemicals[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2010, 50(3): 193-208.

[3] CHEN Xin, NIE Lin-jie, CHEN Hong-liang, et al. Effect of degree of substitution of carboxymethyl cellulose sodium on the state of water, rheological and baking performance of frozen bread dough[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 8-14.

[4] WANG Pei, YANG Run-qiang, GU Zhen-xin, et al. Com-

parative study of deterioration procedure in chemical-leavened steamed bread dough under frozen storage and freeze/thaw condition[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 464-471.

[5] KUMIO Y, MACHIKO S, KENJI S. Simple improvement in freeze-tolerance of bakers' yeast with poly- γ -glutamate[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 102(3): 215-219.

[6] 疏秀林, 施庆珊, 黄小荣, 等. γ -聚谷氨酸及其衍生物在生物医学领域中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2012(16): 3 009-3 012.

[7] 时晓剑, 缪冶炼, 卫昊, 等. γ -聚谷氨酸钠对面包酵母的抗冻作用及其机理[J]. 食品科技, 2012(10): 2-6.

[8] 谢新华, 毋修远, 张蓓, 等. γ -聚谷氨酸对面筋蛋白冻藏稳定性的影响[J]. 农业机械学报, 2018(7): 97-101.

[9] 谢新华, 毋修远, 张蓓, 等. γ -聚谷氨酸对面筋蛋白功能特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 1 004-1 009.

[10] 范逸超, 谢新华, 沈玥, 等. γ -聚谷氨酸对小麦淀粉糊化及流变学特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019(5): 33-37.

[11] 黄桂东, 黄伟志, 冯结铎, 等. 冻藏时间对冷冻面团馒头品质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 50-57.

[12] 陈诚, 张宾乐, 王家宝, 等. 蔗糖酯与淀粉酶改善海绵蛋糕品质特性[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 1-6.

[13] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 搅拌时间和乳化剂对海绵蛋糕表面气泡的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 8-13, 70.

[14] 张可欣, 蒋慧, 汤晓娟, 等. 复合酶制剂对甜酒酿面包发酵烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(1): 16-21.

[15] TANG Xiao-juan, LIU Ruo-shi, HUANG Wei-ning, et al. Impact of in situ formed exopolysaccharides on dough performance and quality of Chinese steamed bread[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 519-525.

[16] 王家宝. 含丙二醇酯的低脂蛋糕烘焙特性与品质改良研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 12.

[17] ISHWAR B, REKHA S. Poly (γ -glutamic acid): An emerging biopolymer of commercial interest[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 5 551-5 561.

[18] LU Lu, XING Jun-jie, GUO Xiao-na, et al. Enhancing the freezing-thawing tolerance of frozen dough using ϵ -poly-L-lysine treated yeast[J]. Food Bioence, 2020, 37: 1-7.

(下转第 41 页)

- [14] 桑筱筱, 操燕明, 杨艾玲, 等. 高产淀粉酶菌株诱变筛选及其发酵工艺的研究[J]. 生物化工, 2018, 4(6): 14-17, 22.
- [15] 陈蕊, 别小妹, 吕凤霞, 等. 枯草芽孢杆菌 PNG27 生产凝乳酶的发酵工艺优化及分离纯化研究[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 110-117.
- [16] 谷月. 发酵法制备口用型烟草制品烟丝及其品质变化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 17-19.
- [17] 赵淑琴, 杨孝朴. 一株产 α -淀粉酶菌株的分离筛选、鉴定及酶学性质研究[J]. 中国酿造, 2018, 37(2): 60-65.
- [18] 聂晶晶, 叶建斌, 马科, 等. 解淀粉芽孢杆菌 Y11 产淀粉酶的条件优化[J]. 农产品加工, 2019(10): 34-39.
- [19] 胡红伟, 段明房, 闫凌鹏, 等. 一株枯草芽孢杆菌的鉴定及液体发酵工艺优化[J]. 中国饲料, 2017(5): 13-19.
- [20] 代阳, 魏利, 王继华, 等. 枯草芽孢杆菌发酵条件优化及其破乳效能[J]. 微生物学通报, 2010, 37(4): 580-585.
- [21] 杜红丽, 郝亚男, 陈宁, 等. 有机氮源及其在微生物发酵中的应用[J]. 发酵科技通讯, 2019, 48(1): 1-4.
- [22] 王超明, 何菊华, 刘玥, 等. 有机氮源对腺苷发酵的影响[J]. 发酵科技通讯, 2014, 43(4): 7-10.
- [23] 韩唱, 宿玲恰, 吴敬. *Sulfolobus acidocaldarius* ATCC 33909 麦芽寡糖基海藻糖合成酶在 *Bacillus subtilis* 中的重组表达和发酵优化[J]. 生物技术通报, 2017, 33(7): 162-168.
- [24] 杨贞妮, 郭旋, 钟近艺, 等. 重组枯草芽孢杆菌分泌表达缺陷假单胞菌磷酸三酯酶及其发酵优化[J]. 中国科学(生命科学), 2019, 49(5): 625-636.
- [25] 余茜, 张国丽, 敖晓琳. 金属离子对微生物蛋白酶活性的影响及机理[J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 287-294.
- [26] 丁翠珍, 裴季燕, 刘伟成, 等. 枯草芽孢杆菌 B02 产生拮抗物质培养基及发酵条件优化[J]. 中国生物防治, 2008(2): 159-163.
- [27] 王越. 长野芽孢杆菌普鲁兰酶基因在枯草芽孢杆菌中的整合表达[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 10-31.
- [28] 冯颖杰, 王鹏飞, 陈芝飞, 等. 烟叶中 1 株可高效降解淀粉的菌株筛选与作用效果研究[J]. 河南农业科学, 2018, 47(1): 150-154.
- [29] 杜咏梅, 郭承芳, 张怀宝, 等. 水溶性糖、烟碱、总氮含量与烤烟吃味品质的关系研究[J]. 中国烟草科学, 2000(1): 9-12.
- [30] 程传玲, 杨艳勤, 刘仕民, 等. 美拉德反应产物在烟草工业中的应用[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版), 2014, 29(1): 59-62.
- [31] 陈颐, 杨虹琦, 杨佳玫, 等. 不同香型烤烟香气前体物特征及其对感官评吸的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(3): 489-497.
- [32] 沈晗, 杨凯, 任伟, 等. 影响上部烟叶感官质量的主要化学成分分析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(6): 18-26.
-
- (上接第 13 页)
- [19] 丁珊珊, 贾春利, 张峦, 等. γ -聚谷氨酸提高冷冻甜面团包质构和感官特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 308-311.
- [20] KIM Y S, HUANG Wei-ning, DU Guo-cheng, et al. Effects of trehalose, transglutaminase, and gum on rheological, fermentation, and baking properties of frozen dough[J]. Food Research International, 2008, 41(9): 903-908.
- [21] JIA Chun-li, HUANG Wei-ning, TANG Xiao-juan, et al. Antifreeze activity of γ -poly glutamic acid and its impact on freezing resistance of yeast and frozen sweet dough[J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(3): 306-313.
- [22] XU Hua-neng, HUANG Wei-ning, JIA Chun-li, et al. Evaluation of water holding capacity and breadmaking properties for frozen dough containing ice structuring proteins from winter wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 250-253.
- [23] 谢新华, 范逸超, 徐超, 等. γ -聚谷氨酸对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 97-101.
- [24] SHYU Yung-shin, HWANG Jean-yu, HSU Cheng-kuang. Improving the rheological and thermal properties of wheat dough by the addition of γ -polyglutamic acid[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(6): 982-987.
- [25] OMEDI J O, HUANG Wei-ning. Advances in present-day frozen dough technology and its improver and novel biotech ingredients development trends: A review[J]. Cereal Chemistry, 2018, 96: 34-56.
- [26] SHYU Yung-shin, SUNG Wen-chieh. Improving the emulsion stability of sponge cake by the addition of gamma-polyglutamic acid [J]. Journal of Marine Food Engineering & Technology, 2010, 18(6): 895-900.
- [27] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 含丙二醇酯低脂蛋糕的流变学、气泡微结构和烘焙特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 1-7.
- [28] CHAKRABARTI-BELL S, WANG Shuo, SIDDIQUE K H M. Flour quality and disproportionation of bubbles in bread doughs [J]. Food Research International, 2014, 64: 587-597.
- [29] 姜培彦, 马晓军, 余斌, 等. 乳化剂与直链淀粉相互作用及其对蛋糕品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2008(2): 247-250.
- [30] 王家宝, 黄美凤, 杨笛, 等. 脂肪酶替代双乙酰酒石酸单双甘油酯对压面团流变学和面包烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 38-42.
- [31] 姬晓月, 王双燕, 耿鹏, 等. γ -聚谷氨酸对速冻水饺品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(12): 180-187.